施盐和磷对台湾相思幼苗光合作用及养分特征的影响

陈增焰 [1, 2]，陈 灿 [1, 2*]，袁锋 [1, 2]，江传阳 [3]，金学伟 [1, 2]，陈子川 [1, 2]，林晗 [1, 2]，吴承祯 [2, 4]

(1. 福建农林大学 林学院， 福州 350002；2. 森林生态系统过程与经营福建省高校重点实验室， 福州 350002；3. 福建省晋江坫头国有防护林场, 福建 泉州 362200；4. 武夷学院，福建 南平 354300)

摘 要：为探究施盐磷对重要海防林树种台湾相思幼苗叶光合作用与养分特征的影响，该文设置 0%(B_0)、0.2%(B_1)、0.4%(B_2)、0.6%(B_3)和 0.8%(B_4)的 NaCl 溶液和不施 (P_0)、0.5 $g \cdot kg^{-1}$(P_1)和 1.5 $g \cdot kg^{-1}$(P_2) 3 个供磷水平过磷酸钙磷肥，在此基础设置盐磷 6 个耦合处理，测定幼苗光合作用和养分特征指标。结果表明：（1）盐胁迫显著抑制台湾相思幼苗的生长发育，盐度含量越高，影响程度越大。低盐施磷对台湾相思幼苗生长不利，中高盐施磷显著减缓盐对幼苗生长的抑制作用。（2）台湾相思幼苗光合作用受盐胁迫影响显著。中低盐施磷后气孔关闭程度上升从而加剧盐胁迫对幼苗光合作用的影响，但高盐适当施磷可显著提高台湾相思幼苗光合能力。（3）盐胁迫显著降低叶绿素含量，且对光系统II造成危害。低盐胁迫施磷对台湾相思幼苗叶绿素合成不利，高盐适当施磷可以提高叶绿素合成量、稳定细胞膜结构以及提高叶片潜在光合能力。（4）盐胁迫对叶的 Fe、Mn、Na、Cu 等金属元素含量有较强干扰。盐胁迫基础上施磷有效促进幼苗对部分元素的吸收。整体上，盐胁迫条件上施磷可以提高台湾相思幼苗光合作用和吸收养分的能力。该研究结果为提高台湾相思树的耐盐性以及磷利用率提供理论依据，为沿海防护林可持续经营提供指导意义。

关键词： 盐胁迫，磷肥，光合作用，养分含量，台湾相思幼苗

中图分类号：Q945　　　　　　　　**文献标识码：**A

Effects of salt and phosphorus fertilization on photosynthesis and nutrient characteristics of *Acacia confusa*

CHEN Zengyan[1, 2], CHEN Can[1, 2*], YUAN Feng[1, 2], JIANG Chuanyang[3], JIN Xuewei[1, 2], CHEN Zichuan[1, 2], LIN Han[1, 2], WU Chengzhen[2, 4]

(1. *College of Forestry*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, Fuzhou 350002, China; 2. *Collegiate Key Lab of Forest-Ecosystem Process and Management in Fujian*, Fuzhou 350002, China; 3. *Diantou State-owned Protective Forest Farm of Jinjiang*, Quanzhou 362200, China; 4. *Wuyi University*, Nanping 354300, Fujian, China）

Abstract： *Acacia confusa* is an important species in coastal shelter forests. The aim of this paper is to explore the effects of salt and phosphorus fertilization on leaf photosynthesis and nutrient characteristics of the seedlings. NaCl solutions were configured in the concentration of 0% (B_0),

---

基金项目：国家自然科学基金(42071132)；福建省林业科技项目(2021FKJ22)；福州市科技项目（榕科[2021]266 号）；福建农林大学优秀研究生学位论文资助基金（1122YS01010）[Supported by National Natural Science Foundation of China(42071132); Fujian Forestry Science and Technology Foundation(2021FKJ22); Fuzhou Science and Technology Foundation(RK [2021]266); Outstanding Graduate Dissertation Funding of Fujian Agriculture and Forestry University（1122YS01010）]。

第一作者：陈增焰(1998-)，硕士研究生，主要从事森林培育学研究，(E-mail)809245897@qq.com。

*通信作者：陈灿，博士，副教授，主要从事海岸带森林与环境研究，(E-mail) canchen@fafu.edu.cn。

0.2% (B_1), 0.4% (B_2), 0.6% (B_3) and 0.8% (B_4), and superphosphate solutions in the concentration of 0 g·kg^{-1}(P_0), 0.5 g·kg^{-1}(P_1), and 1.5 g·kg^{-1}(P_2). The photosynthesis and nutrient characteristics of the seedlings were determined after being watered by the 6 combined solutions of salt-phosphorus coupling fertilization. The results were as follows: (1) Salt stress significantly inhibited the growth and development of the seedlings, and the higher the salinity content, the greater the impacts. Phosphorus application under low-salt stress was unfavorable to the growth of the seedlings, while phosphorus application under medium-high one significantly slowed down the inhibition of the seedling growth. (2) The greater the salt stress, the higher the effects on the photosynthesis of the seedlings. The stomatal closure degree of phosphorus application increased under low and medium salt stress, which aggravated the effect of salt stress on photosynthesis of the seedlings. Appropriate phosphorus application under high-salt stress could significantly improve the photosynthetic capacity of the seedlings. (3) Salt stress significantly reduced chlorophyll content and harms photosystem II. Phosphorus fertilization on the seedlings under low-salt stress had adverse effects on chlorophyll synthesis. Appropriate fertilization of phosphorus in high-salt stress could increase chlorophyll synthesis, stabilize cell membrane structure, and improve the potential photosynthetic capacity of leaves. (4) Salt stress had strong interference on the contents of Fe, Mn, Na, Cu and other metal elements in leaves. Phosphorus application under salt stress could effectively promote the absorption of some elements by seedlings. In conclusion, phosphorus application after salt stress can improve the photosynthesis and nutrient uptake ability of *A. confusa* seedlings on the whole. The results provides a theoretical and practical basis for improving the salt tolerance and phosphorus utilization rate of *A. confusa*, and provided guidance for the sustainable management of coastal shelterbelts.

Key words: salt stress, phosphorus fertilization, photosynthesis, nutrient content, *Acacia confusa* seedlings

滨海地区土壤盐碱化和缺磷已威胁到沿海防护林生存和国家生态安全。土壤盐碱化是限制植物生产力的重要环境因素之一（Khalid，2009），当前世界土壤盐碱化面积逐年增加，仅中国土壤盐碱化面积就达 3 400 多万公顷，滨海盐碱地 1 m 土层内含盐量一般均在 4 g·kg^{-1} 以上，严重危害包括海防林在内的农林业的可持续经营与发展(Fascella et al.，2018；张华新等，2008)。一方面盐胁迫会对林木产生渗透胁迫和干扰营养离子平衡，通过抑制和诱导多种酶系统影响林木的正常生长，另一方面盐胁迫通过影响 PS II 潜在活性和 PS II 原初光能转化效率导致林木光合效率下降（王东明等，2009）。缺磷环境造成植物营养不良极有可能加剧盐伤害作用。南方滨海地区土壤普遍缺磷(苏贻攀，2016)，大部分土壤磷的含量为 0.043%~0.066%（张雨瑶和李世友，2013），限制了植物同化力的形成、卡尔文环中酶的活性、RuBP 的再生以及同化物的运输进而影响植物的光合作用（潘晓华等，1997），并降低整株磷、钾、钙、氮和镁累积量（韦如萍等，2008），加剧海防林更新困难。忽视滨海地区土壤多盐和少磷共同作用对海防林树种的影响，将低估沿海土壤恶劣环境对海防林经营造成的困难，不利于海防林可持续经营和管理。

台湾相思（*Acacia confusa*）广泛分布于我国沿海地区，是一种维护成本低的重要沿海防护林树种，对我国南方水土保持等贡献巨大（张清林等，2012）。近年研究发现台湾相思具有一定的耐旱（沙桦欣等，2013）、抗低温能力（张柔等，2014）、强光胁迫(Weng et al.，2011)，也已证实高盐低磷胁迫对台湾相思种子萌发和幼苗生长均会产生不利影响，但对幼苗生长不利影响的机理还尚未完全阐明(袁锋等，2021)。现有林木抗性的研究多专注于盐或磷单一胁迫对林木或作物等植物的影响（陈健妙等，2009；尹勇刚等，2020），大面积土壤中去盐工作难度较大，施磷肥等相对较为简单易行。缺磷条件下施磷通常会促进植物生长，

提高其光合作用，但补施磷是否有助于减缓或消除盐胁迫对植物幼苗的伤害尚未可知。因此，本文尝试以台湾相思幼苗为研究对象，分别测定不同 NaCl 浓度以及在此基础上添加磷肥下台湾相思幼苗的生物量、光合参数、叶绿素含量、叶相对电导率、叶绿素荧光以及养分含量，以期明确在盐胁迫条件下施磷多大程度上改变了台湾相思幼苗叶光合作用与养分特征，并为提高台湾相思的耐盐性和磷利用率以及沿海防护林可持续经营提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地位于 119º13′E、26º05′ N 的福建省福州市福建农林大学田间科技园内，属于亚热带季风气候，地势平坦，无霜期达 326 d，年平均日照数为 1 700~1 980 h，年平均降水量为 900~2 100 mm，年相对湿度约 77%。实验期间最低气温 17 ℃，最高气温 38 ℃，平均气温 24 ℃。

1.2 研究方法

台湾相思选自广州瑞景园林种苗批发中心培育的幼苗，幼苗均为一年生，生长状况良好，适应性强，具备实验条件。选择口径 18 cm，高 19 cm 的塑料盆，每盆放置基质沙土(沙∶土=3:1)4.5 kg，基质 pH 值为 6.30 ± 0.04，含盐量为 0.03%± 0.002%，速效氮、磷、钾分别 0.4 ± 0.05、0.7 ± 0.05 和 1.8 ± 0.7 $g·kg^{-1}$。

幼苗于 2021 年 3 月 28 日种植，每盆一棵，缓苗到 4 月 29 日，测定株高、地径后开始进行胁迫实验，为模拟滨海盐碱地生长条件，盐胁迫采用 NaCl 设置 0%(B_0)、0.2%(B_1)、0.4%(B_2)、0.6%(B_3)和 0.8%(B_4)共 5 个处理（苏祖荣，1999），为防止死亡分四次放入，每次间隔一周。同时在盐胁迫基础上添加磷肥，选择过磷酸钙磷肥(有效磷≥16%，水溶性磷≥11%)设置 3 个供磷水平不施 (P_0)、0.5 $g·kg^{-1}$ (P_1)和 1.5 $g·kg^{-1}$ (P_2)（谢钰容，2003），设置 P_1+B_2；P_1+B_3；P_1+B_4；P_2+B_2；P_2+B_3；P_2+B_4 6 个耦合处理，每个处理 9 盆，共 117 盆，实验于 8 月 1 日结束。

1.3 指标测定

1.3.1 林木形态学测定

每个处理选取 6 棵测定株高、地径，将植株分为根茎叶三部分。称取叶鲜重，105 ℃杀青后 80 ℃恒温烘干后测定叶干重。各形态指标测定如下：

株高相对增长量=阶段测定高度-初始高度 (1)

地径相对增长量=阶段测定地径-初始地径 (2)

相对含水量=(鲜重-干重)/鲜重 (3)

1.3.2 林木生理学指标测定

实验于露天环境进行，光照、二氧化碳浓度等条件与外界一致。选取健康叶片于晴朗天气 7 月 7 日至 7 月 8 日的 9～11 h 采用 LI-6400 便携式光合作用仪(LI-COR,USA)测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率等光合指标。暗处理 20 min 后采用便携式荧光仪(OS-30P，Li-Cor，USA)测定初始荧光(F_0)、最大荧光产量(F_m)、光系统 II（PS II）最大光化学效率(F_v/F_m)等荧光参数。叶绿素含量采用丙酮-乙醇(各 5 mL)混合浸提后，暗处理直至材料变白后利用酶标仪测定 A663 和 A645 波长的吸光值（刘鹏和杨玉爱，2000）。叶片相对电导率测定采用电导率仪法测定（刘艳萍等，2013）。叶烘干后粉碎过 0.149 mm 筛测定养分含量，采用硝酸-过氧化氢在数显温控消化炉进行消解后运用等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PekinElmer, USA)分析测定（袁锋等，2020）。

1.4 数据处理与统计分析

数据指标均采用平均值表示，采用软件 Excel 2016 进行数据统计分析，采用软件 Origin Pro 绘图，利用软件 SPSS 25.0 在单因素方差基础上进行 LSD 显著差异性检验，得到不同处

理间的差异性。

2 结果与分析

2.1 施盐和磷对台湾相思幼苗生长及叶生物量的变化

台湾相思幼苗生长及叶生物量随盐胁迫程度提高，数值下降明显（表 1）。低盐浓度下，幼苗的株高相对增长量、地径相对增长量、叶鲜重、叶干重及叶相对含水量与对照组相比分别降低了 40.74%、4.62%、24.16%、21.98%和 1.47%。高盐浓度下，上述指标分别降低了 70.00%、30.56%、52.57%与 58.27%，降低幅度最大，而叶相对含水量相对于对照组增加了 4.08%。该结果表明盐胁迫对台湾相思的生长起显著抑制作用，胁迫程度越大，影响越大。

表 1 不同 NaCl 浓度下台湾相思幼苗的生长及叶生物量

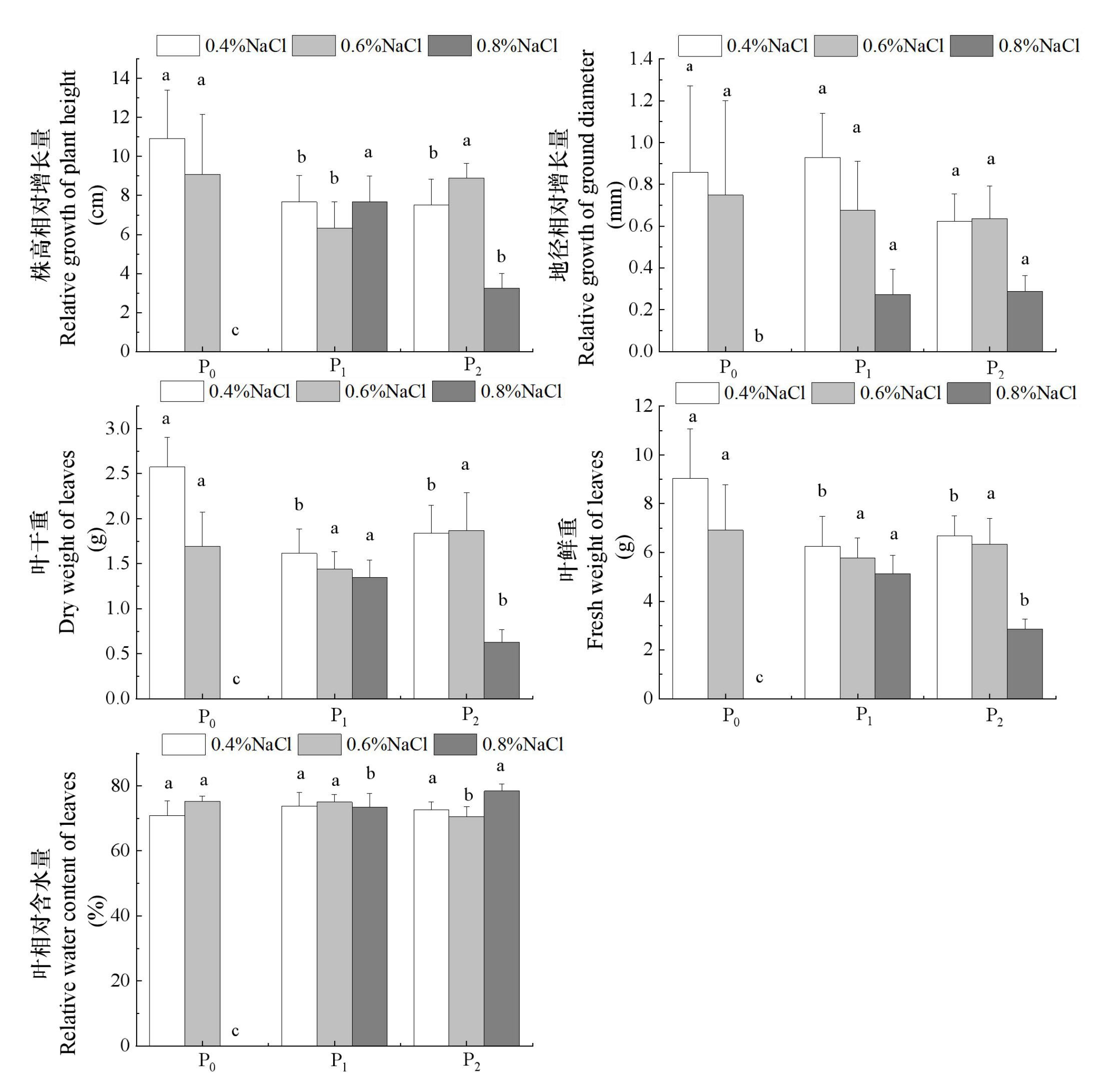
Table1 Growth and leaf biomass of *Acacia confusa* seedlings under different NaCl concentrations

NaCl 浓度 NaCl concentration (%)	株高相对增长量 Relative growth of plant height (cm)	地径相对增长量 Relative growth of ground diameter (mm)	叶鲜重 Fresh weight of leaves (g)	叶干重 Dry weight of leaves (g)	叶相对含水量 Relative water content of leaves (%)
0	23.28±4.78a	1.08±0.31a	14.57±1.53a	4.05±0.58a	72.30±1.62ab
0.2	13.33±2.33b	1.03±0.27a	11.05±2.01b	3.16±0.52b	71.24±1.97b
0.4	10.92±2.50bc	0.86±0.41a	9.04±2.03bc	2.57±0.33bc	70.91±4.46b
0.6	9.08±3.07c	0.75±0.45a	6.91±1.86c	1.69±0.38c	75.25±1.63a

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences（P＜0.05）. The same below.

不同盐浓度下施磷对幼苗生物量影响不同（图 1）。0.4%NaCl 浓度下，P_0 处理下幼苗的株高相对增长量、叶鲜重与叶干重显著高于 P_1、P_2 处理，而地径与相对含水量无显著差异。0.6%NaCl 浓度下，株高相对增长量在 P_1 处理下显著降低，相对含水量在 P_2 处理下显著降低，地径相对增长量、叶鲜重与叶干重在各磷浓度处理下无显著差异。0.8%NaCl 浓度下，P_1 处理下幼苗的株高相对增长量、叶鲜重与叶干重相对于 P_2 处理对幼苗的增加幅度更大，叶相对含水量增加幅度较小，地径相对增长量无显著差异。该结果表明低盐浓度施磷会对台湾相思幼苗生长产生抑制作用，而高盐浓度施低磷相对于高磷更有利于促进幼苗的生长。



不同小写字母表示同一 NaCl 浓度下不同磷处理之间差异显著（$P<0.05$）。下同

Different lowercase letters at the same NaCl concentration indicate significant differences between different phosphorus treatments($P<0.05$).The same below.

图 1 盐胁迫下不同磷浓度对台湾相思幼苗生长及生物量的影响

Fig.1 Effects of different phosphorus concentrations on the growth and biomass of *Acacia confusa* seedlings under salt stress

2.2 施盐和磷对台湾相思幼苗叶光合参数的变化

盐胁迫下的台湾相思幼苗的光合参数受到显著影响，盐度含量越高，影响程度越大（表 2）。低盐浓度下，幼苗的净光合速率与蒸腾速率相对于对照组分别降低了 1.08%与 4.15%，气孔导度与胞间 CO_2 浓度分别增加了 16.67%与 5.60%。高盐浓度下，幼苗的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度与蒸腾速率分别降低了 69.40%、83.33%、28.72%与 77.86%。该结果表明高盐胁迫下，幼苗的光合能力受到显著抑制。

表 2 不同 NaCl 浓度下台湾相思幼苗的光合参数

Table 2 Photosynthetic parameters of *Acacia confusa* seedlings under different NaCl concentrations

NaCl 浓度 NaCl concentration (%)	净光合速率 Net photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率 Transpiration rate

	(μmol·m^{-2}·s^{-1})	(mol·m^{-2}·s^{-1})	(μmol·mol^{-1})	(mmol·m^{-2}·s^{-1})
0	11.93±0.45a	0.24±0.01a	282.83±6.07a	7.95±0.41a
0.2	10.85±0.75a	0.28±0.07a	298.67±17.06a	7.62±0.74a
0.4	6.60±1.10b	0.09±0.03b	251.83±10.22b	3.27±1.06b
0.6	3.65±0.73c	0.04±0.02c	201.60±42.97c	1.76±0.67c

施磷对中低盐胁迫下的台湾相思幼苗的光合参数起抑制作用；而对高盐胁迫则相反，且低磷处理较高磷处理起到的促进作用更大（图 2）。0.4%NaCl 与 0.6%NaCl 浓度下，P_0 处理下幼苗的光合参数数值普遍高于 P_1、P_2 处理，同时 P_2 处理下幼苗的光和参数数值下降幅度更大。0.8%NaCl 浓度下， P_1、P_2 处理下幼苗的光合参数数值增加，该结果表明在高盐胁迫基础上补施磷能够大幅提高幼苗的光合能力。

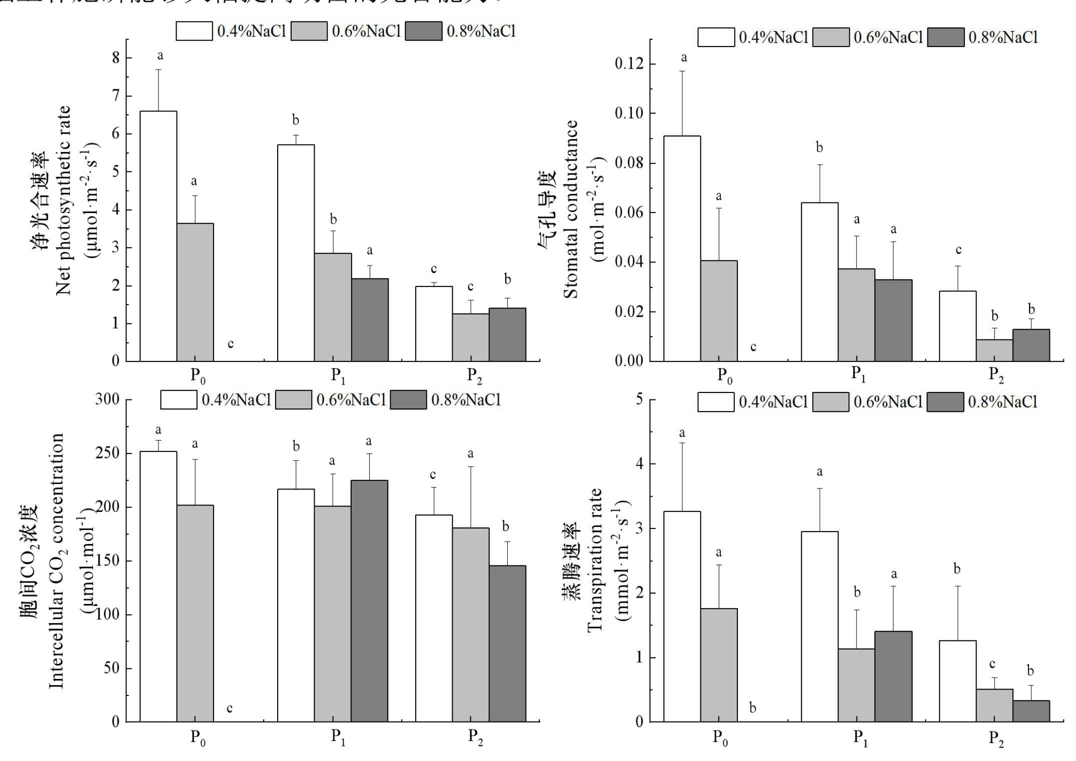


图 2 盐胁迫下不同磷浓度对台湾相思幼苗叶光合参数的影响

Fig.2 Effects of different phosphorus concentrations on leaf photosynthetic parameters of *Acacia confusa* seedlings under salt stress

2.3 施盐和磷对台湾相思幼苗叶绿素含量与叶绿素荧光的变化

随着 NaCl 浓度增加，叶绿素含量显著降低，叶相对电导率显著增加， F_v/F_m 先增后降（表 3）。0.2%NaCl 浓度下，叶绿素 a、b 含量与叶绿素总含量分别降低 23.95%、18.33%与 22.03%，叶相对电导率和 F_v/F_m 分别增加 28.34%和 2.78%。0.4%NaCl 浓度下，F_v/F_m 值最高。0.6%NaCl 浓度下，叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量与叶绿素总含量分别降低 65.27%、55.00%与 62.56%，叶相对电导率与 F_v/F_m 分别增加 82.14%与 1.39%。该结果表明盐胁迫显著抑制幼苗叶绿素合成，且在高盐胁迫下 PS II 受到危害。

表 3 不同 NaCl 浓度下台湾相思幼苗的叶绿素含量与叶绿素荧光

Table 3 Chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence of *Acacia confusa* seedlings under different NaCl concentrations

NaCl 浓度 NaCl	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	叶绿素总含量 Total	叶相对电导率	初始荧光 F_0	最大荧光产量 F_m	PS II最大光化学效率

concentration (%)	Chlorophyll a content (mg·g^{-1})	Chlorophyll b content (mg·g^{-1})	chlorophyll content (mg·g^{-1})	Relative conductivity of leaves (%)			F_v/F_m
0	1.67±0.06a	0.60±0.02a	2.27±0.07a	33.60±1.37c	115.00±3.78a	403.17±20.47c	0.72±0.02b
0.2	1.27±0.04b	0.49±0.11b	1.77±0.05b	46.89±3.47b	110.37±4.78b	438.67±52.66bc	0.74±0.03b
0.4	1.21±0.02b	0.45±0.23c	1.66±0.01c	59.16±1.63a	108.00±2.00b	462.00±22.91b	0.77±0.01a
0.6	0.58±0.01c	0.27±0.02d	0.85±0.02d	61.20±0.86a	111.00±4.76b	518.14±29.85a	0.73±0.03b

由图 3 可知，0.4%NaCl 浓度下，P_0 处理下台湾相思幼苗的叶绿素含量、叶相对电导率均高于 P_1、P_2 处理，F_v/F_m 在 P_1 处理下取得最大值，P_2 处理下取得最小值。0.6%NaCl 浓度下，随磷浓度增加，叶绿素含量逐渐增加，叶相对电导率逐渐降低， F_v/F_m 在 P_2 处理下取得最小值，P_0 与 P_1 处理无显著差异。0.8%NaCl 浓度下，P_1 处理较 P_2 处理叶绿素含量和叶相对电导率数值大，F_v/F_m 相反。该结果表明在盐胁迫后补施磷能够减缓叶绿素分解速率，提高 PS II的光化学特性。

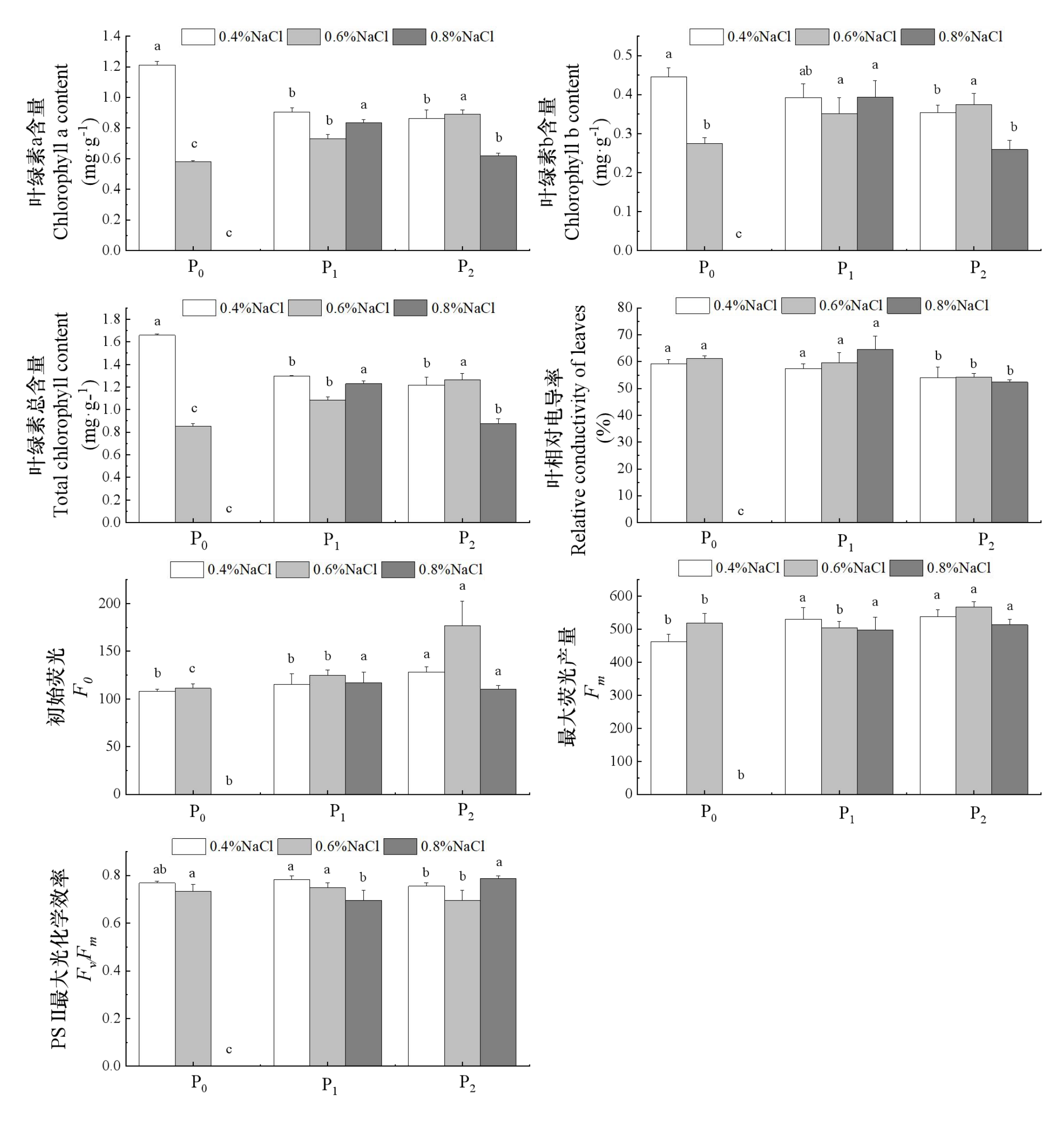


图 3 盐胁迫下不同磷浓度对台湾相思幼苗叶绿素含量与叶绿素荧光的影响

Fig.3 Effects of different phosphorus concentrations on chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence of *Acacia confusa* seedlings under salt stress

2.4 施盐和磷对台湾相思幼苗叶养分特征的变化

由表 4 可知，低盐浓度下，磷（P）、铁（Fe）、铜（Cu）含量与对照组相比降低，锰（Mn）、钙（Ca）、钠（Na）、钾（K）含量增加，镁（Mg）与铝（Al）含量无显著差异。中盐浓度下，P、Fe 及 Al 含量最小，Mn、K 及 Cu 含量最大。高盐浓度下，Mg 与 Al 含量与对照组相比分别降低了 5.88%和 20.00%，Fe、Mn、Na、K 与 Cu 含量与对照组相比分别增加了 47.87%、20.00%、669.31%、18.50%和 111.11%，P 与 Ca 含量无显著差异。该结果表明大量钠离子使得幼苗遭受盐害，并干扰其他元素的吸收。

表 4 不同 NaCl 浓度下台湾相思幼苗的养分含量

Table 4 Nutrient contents of *Acacia confusa* under different NaCl concentrations

NaCl 浓度 NaCl concentration (%)	P (g·kg^{-1})	Fe (g·kg^{-1})	Mn (g·kg^{-1})	Mg (g·kg^{-1})	Ca (g·kg^{-1})	Al (g·kg^{-1})	Na (g·kg^{-1})	K (g·kg^{-1})	Cu (g·kg^{-1})
0	0.99±0.02a	0.94±0.07b	0.05±0.00d	1.19±0.04a	5.39±0.16b	0.80±0.09a	1.89±0.01d	11.08±0.17c	0.18±0.01c
0.2	0.90±0.02b	0.70±0.05c	0.08±0.00b	1.20±0.07a	5.93±0.25a	0.84±0.03a	4.90±0.27c	11.93±0.31b	0.03±0.02d
0.4	0.81±0.02c	0.40±0.01d	0.10±0.00a	1.19±0.01a	5.89±0.10a	0.50±0.02c	9.53±0.22b	13.29±0.22a	0.45±0.04a
0.6	1.02±0.01a	1.39±0.11a	0.06±0.00c	1.12±0.01b	5.37±0.21b	0.64±0.02b	12.65±0.25a	13.13±0.35a	0.38±0.04b

由图 4 可知，0.4%NaCl 浓度下，台湾相思幼苗的 P、Fe、Mn、Mg、Ca、Al、K 和 Cu 含量均随磷浓度增加而增加，而 Na 含量在 P_1 处理下最小，P_2 处理下最大。0.6%NaCl 浓度下，P、Mg、Ca、Al、Na 含量均随磷浓度增加先降后增，其中 P、Mg、Ca 在 P_0 处理下最大，而 Al、Na 在 P_2 处理下最大，而 Fe、Mn、K、Cu 含量均随磷浓度增加而增加。0.8%NaCl 浓度下，除 Mg 与 K 含量在 P_1 处理下取得最大值外，其他养分含量均在 P_2 处理下取得最大值。该结果表明盐胁迫后补施磷能够缓解盐害作用，一定程度上利于幼苗吸收其他元素。

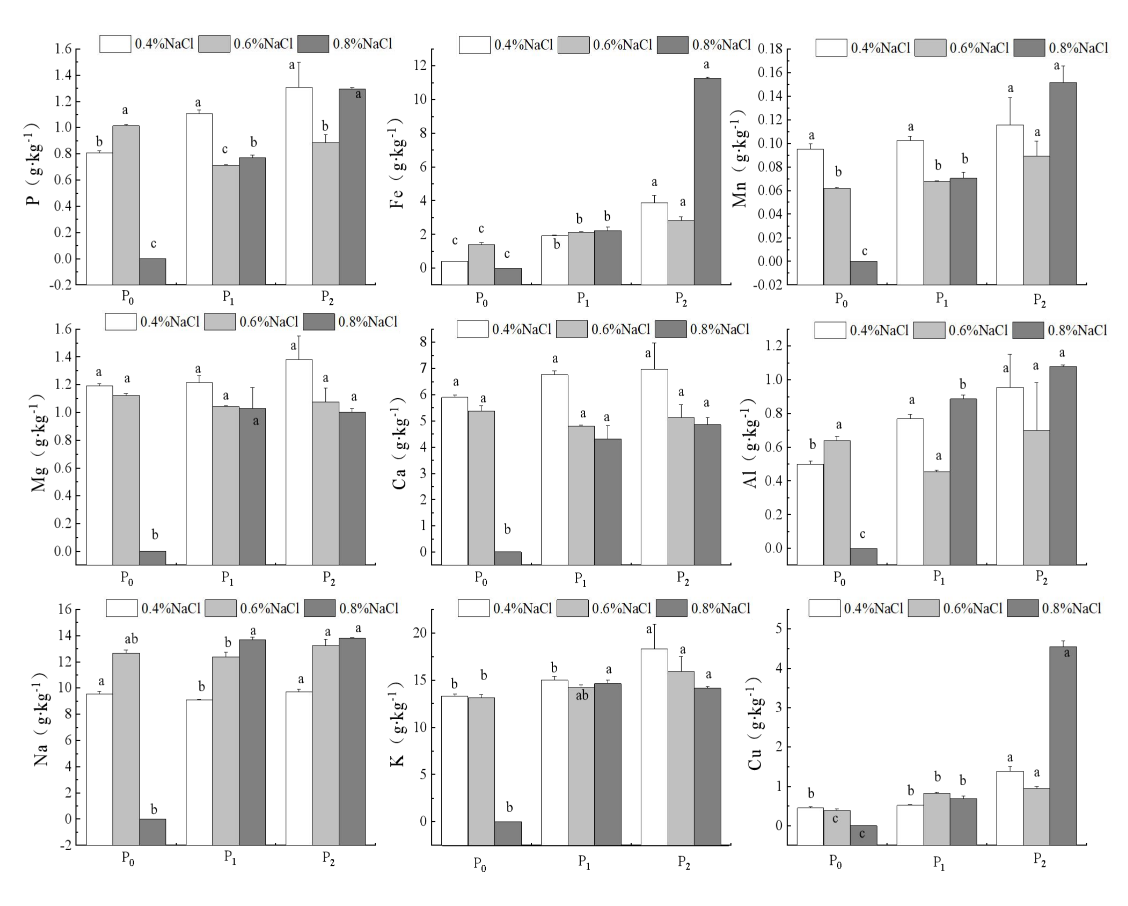


图 4 盐胁迫下不同磷浓度对台湾相思幼苗养分含量的影响

Fig.4 Effects of different phosphorus concentrations on nutrient contents of *Acacia confusa* under salt stress

3 讨论

生长状况的变化是植物受环境胁迫影响最直观的响应机制（王佺珍等，2017）。盐胁迫下植株生长受影响的生理机制是多方面的，如营养离子平衡受到干扰、内源激素含量发生变化以及植物遗传物质受影响等（王东明等，2009）。本试验发现盐胁迫对台湾相思幼苗的生长起明显抑制作用，并随盐度增高而增强，该结果与多数盐胁迫研究结果一致（汪贵斌和曹福亮，2003；张建锋等，2005），主要原因是虽然高盐胁迫能够激发植物幼苗自身水分调节能力与保水能力，但这种调节须在一定范围内，无论是胞内还是胞间对盐离子的吸收、运输和转运均不能无节制破坏植物体内盐离子浓度平衡而无损植物抗性。在盐胁迫基础上补施磷的试验结果表明对台湾相思幼苗施加磷素过多会降低耐盐性提升水平，这与蒋乔峰等（蒋乔峰等，2013）研究一致，造成这种现象的原因可能是磷提高了钠在木质部中的向顶运输从而影响幼苗的耐盐性，在幼苗盐分敏感时期过量施磷很可能会加剧盐胁迫对幼苗生长的影响（廖红等，2006）。此外，通过含有盐和磷的离子进入细胞后改变植物细胞水势和细胞组分也会影响细胞生长、生物量积累和光合作用。

光合作用是植物产生有机体的重要生理进程，极易受环境胁迫的影响（尹勇刚等，2020）。盐胁迫下植物光合速率下降的原因主要有影响 CO_2 扩散到结合部位、改变负责光反应的细胞器的结构和功能、改变暗反应的化学过程以及抑制同化产物转移（王东明等，2009）。本试验中低盐浓度下幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度的波动说明此时非气孔因素为光合作用的主要限制因素。中高盐处理上述指标均随盐浓度反向变化说明此时气孔因素为光合作用的主要限制因素。植物地上部分对盐胁迫反应有一定的滞后性的主要原因是盐主要从通过根系吸收进入植物体内，由根至叶等地上部位需要一定的时间。此外，叶绿素是光合作用的主要色素，随着盐浓度增加，叶绿素水解酶活性增大，使得叶绿素 a 与 b 合成减少，分解增加，从而影响光能的吸收与转化（陈健妙等，2009）。叶相对电导率随盐浓度的增加逐渐增加，主要原因是叶片细胞原生质膜的膜透性增大，离子渗透增强，从而加剧了离子伤害对光合作用的影响（孙海菁等，2009）。因叶片远离根部，结合 F_v/F_m 先增加后降低的结果，表明 PS II 仅在高盐胁迫下受到危害，此时叶片潜在活力降低（柯裕州等，2009）。在盐胁迫基础上补施磷的试验结果表明中低盐胁迫下施磷，植物通过调节体内的水分分配维持根部的细胞内外离子平衡，可能降低叶中水分含量，造成气孔的关闭程度上升，导致光合受阻；高盐胁迫下磷营养的改善极大增加气孔导度，提高幼苗叶绿素 a 与 b 含量，并在一定程度上减弱因盐胁迫引起的叶绿素分解代谢，利于提高叶绿体光系统 II 的光化学效率，发挥叶绿素潜能（张玉斌，2009）。在高盐胁迫下适当增加磷含量还有助于稳定细胞膜结构（王玉凤等，2021）。低磷处理较高磷处理 F_v/F_m 增加量小，可能原因是在高盐胁迫下适当增加磷含量能够提高 PS II 的光化学特性、幼苗潜在活性以及原初光能转化效率（连慧达，2015）。

植物对矿质元素的吸收是生物量积累的基础（邢英英等，2014），也是实现植物良好生长发育的关键。盐胁迫下土壤中的 NaCl 通常会改变离子平衡，导致盐离子与营养元素比例发生变化，植物正常生理代谢受影响（陈少良等，2002）。本试验中不同程度盐胁迫下，台湾相思幼苗对磷、铁、镁、铝、铜元素的吸收受到抑制，而锰、钙、钠、钾元素吸收量增加，可能原因是盐胁迫下大量的钠离子破坏了台湾相思幼苗体内的离子平衡，造成严重的单盐毒害，干扰了幼苗对磷、铁、镁、铝、铜元素的吸收。而磷、铁、镁、铝、铜元素含量一定程度上影响植物的生长速率、光合速率、叶绿素合成与多方面抗逆性（史晓龙等，2018），说明长期盐胁迫会对植物的生长速率、光合速率、叶绿素合成与多方面抗逆性产生不利影响。

在盐胁迫基础上补施磷的试验结果表明低盐胁迫下，施加磷一定程度上能够抑制钠离子对幼苗的毒害作用，促进幼苗对其他元素的吸收。中盐浓度下，施加磷能够促进台湾相思幼苗对铁、锰、钾、铜元素的吸收。高盐浓度下，低磷处理较高磷处理对于台湾相思幼苗吸收镁与钾元素起到的促进作用更大，而台湾相思幼苗对其他元素的吸收则是在高磷处理下受到的促进作用更大，主要原因可能是植物在抗盐过程中急需补充相应的金属离子。金属离子在植物体内较为活跃，盐胁迫和施磷均造成根系周围离子环境的巨大变化，植物为保证体内养分均衡，维持正常生理生命活动，金属离子浓度必然发生波动，但因涉及到众多离子，且各离子电荷不同，含量不同，因此，每种离子的变化规律还不明显。

4 结论

不同盐分不同程度上抑制了台湾相思幼苗的生长发育、光合能力以及获取养分的能力；在盐胁迫基础上施磷，浓度不同效果不同。台湾相思幼苗对低盐浓度有一定的耐受性，随着盐胁迫程度提升，台湾相思幼苗的光合能力与获取养分的能力受到的抑制加强，从而导致台湾相思幼苗难以正常生长发育。高盐胁迫下，对台湾相思幼苗施磷能够有效促进台湾相思幼苗的生长发育、光合能力以及获取养分的能力。本文揭示了施盐磷对台湾相思幼苗叶光合作用与养分特征的影响，但对于台湾相思幼苗盐磷在生理和分子水平交互作用的机理以及各离子波动规律和内在机制尚不清楚，需要更进一步的研究。

参考文献：

CHEN JM, ZHENG QS, LIU ZP, et al., 2009. Growing and photosynthetic response of *Jatropha curcas* L. seedlings to salt stress[J]. Acta Ecol Sin, 29(3):1356-1365.[陈健妙，郑青松，刘兆普，等，2009. 麻疯树(*Jatropha curcas* L.)幼苗生长和光合作用对盐胁迫的响应[J]. 生态学报，29(3)：1356-1365.]

CHEN SL, LI JK, YIN WL, et al., 2002. Tissue and cellular K^+, Ca^{2+} and Mg^{2+} of poplar under saline salt stress conditions[J]. J Beijing For Univ, 24(Z1):88-92.[陈少良，李金克，尹伟伦，等，2002. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化[J]. 北京林业大学学报，24(Z1)：88-92.]

FASCELLA G, MAMMANO MM, D'AGIOLILLO F, et al., 2018. Effects of conifer wood biochar as a substrate component on ornamental performance, photosynthetic activity, and mineral composition of potted Rosa rugosa[J]. J Hortic Sci Biotechnol, 93(5): 519-528.

JIANG QF, CHEN JB, ZONG JQ, et al., 2013. Effect of phosphorus on Na^+ and K^+ concentrations and the growth of *Zoysia matrella* under salt stress[J]. Acta Pratacul Sin, 22(3): 162-168.[蒋乔峰，陈静波，宗俊勤，等，2013. 盐胁迫下磷素对沟叶结缕草生长及Na^+和 K^+含量的影响[J]. 草业学报，22(3)：162-168.]

KE YZ, ZHOU JX, LU N, et al., 2009. Effects of salinity on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence characteristics of mulberry (*Morus alba*) seedlings[J]. For Res, 22(2): 200-206.[柯裕州，周金星，卢楠，等，2009. 盐胁迫对桑树幼苗光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 林业科学研究，22(2)：200-206.]

KHALID H, 2009. Effect of different levels of salinity on growth and ion contents of black seeds (*Nigella sativa* L.)[J]. Curr Res J Biol Sci, 1(3): 135-138.

LIAN HD, PEI HB, ZHANG YQ, et al., 2015. Effect of phosphorus fertilization on morphological and physiological characteristics of adzuki beans[J]. J Plant Nutr Fert, 21 (3):792-799.[连慧达，裴红宾，张永清，等，2015. 施磷量对不同品种红小豆形态和生理

特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，21(3)：792-799.]
LIAO H, ZHANG MG, KONG FL, et al., 2006. *Soybean* (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and long-distance transport of sodium and phosphorus ions under salt and low phosphorus coupled stresses[J]. Plant Physiol J, 56(1):19-23.[廖红，张秒高，孔凡利，等，2006. 盐磷耦合胁迫下大豆的生长和钠、磷离子长距离运输[J]. 植物生理学通讯，56(1)：19-23.]
LIU P, YANG YA, 2000. Effects of molybdenum and boron on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of *soybean* leaves[J]. J Integr Plant Biol, 18(5):461-466.[刘鹏，杨玉爱，2000. 钼、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. 植物学报，18(5)：461-466.]
LIU YP, ZHU YL, KANG XY, et al., 2013. Evaluation of cold resistance of different types of *Magnolia grandiflora*[J]. Sci Silv Sin, 49(6):178-183.[刘艳萍，朱延林，康向阳，等，2013. 不同类型广玉兰的抗寒性评价[J]. 林业科学，49(6)：178-183.]
PAN XH, SHI QH, GUO JY, et al., 1997. Effects of inorganic phosphorus on plant leaf photosynthesis and its mechanism[J]. J Plant Nutr Fert, 4(3):201-208.[潘晓华，石庆华，郭进耀，等，1997. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报，4(3)：201-208.]
SHA HX, WU JR, MA HC, et al., 2013. Inoculation of rhizobia strains enhance the growth and drought tolerance of *Acacia confusa*[J]. J Yunnan Agric Univ(Nat Sci Ed), 28(4):517-522.[沙桦欣，伍建榕，马焕成，等，2013. 接种根瘤菌对台湾相思生长和抗旱能力的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版)，28(4)：517-522.]
SHI XL, ZHANG ZM, DAI LX, et al., 2018. Effects of calcium fertilizer application on absorption and distribution of nutrients in peanut under salt stress[J]. J Appl Ecol, 29 (10):3302-3310.[史晓龙，张智猛，戴良香，等，2018. 外源施钙对盐胁迫下花生营养元素吸收与分配的影响[J]. 应用生态学报，29(10)：3302-3310.]
SU YP, 2016. The effect on soil nutrients content in *Eucalyptus* plantation of continuous planting and countermeasures[J]. J Fujian For Sci Technol, 43(2):206-211.[苏贻攀，2016. 桉树连栽对土壤养分含量的影响及应对措施[J]. 福建林业科技，43(2)：206-211.]
SU ZR, 1999. Experimental study on salt resistance of *Casuarina equisetifolia* and its salt reduction technology[J]. Prot Forest Sci Technol, 17(1):17-19.[苏祖荣，1999. 木麻黄抗盐能力及降盐技术试验研究[J]. 防护林科技，17(1)：17-19.]
SUN HJ, WANG SF, CHEN YT, 2009. Effects of salt stress on growth and physiological index of six tree species[J]. For Res, 22(3):315-324.[孙海菁，王树凤，陈益泰，2009. 盐胁迫对 6 个树种的生长及生理指标的影响[J]. 林业科学研究，22(3)：315-324.]
WANG DM, JIA Y, CUI JZ, 2009. Advances in research on effects of salt stress on plant and adaptive mechanism of the plant to salinity[J]. Chin Agric Sci Bull, 25(4):124-128.[王东明，贾媛，崔继哲，2009. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报，25(4)：124-128.]
WANG GB,CAO FL, 2003. Effects of salinity on growth and physiology of bald cypress seedlings[J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed), 46(3):11-14.[汪贵斌，曹福亮，2003. 盐胁迫对落羽杉生理及生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，46(3)：11-14.]
WANG QZ, LIU Q, GAO YN, et al., 2017. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecol Sin, 37(16): 5565-5577.[王佺珍，刘倩，高娅妮，等，2017. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报，37(16)：5565-55

77.]
WANG YF, XUE YW, YANG KJ, 2021. Effects of phosphorus on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in the maize seedlings under salt stress[J]. J Maize Sci, 29 (2): 69-74.[王玉凤，薛盈文，杨克军，2021. 磷对盐胁迫下玉米幼苗脂质过氧化特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 玉米科学，29(2)：69-74.]
WENG JH, CHIEN CT, CHEN CW, et al., 2011. Effects of osmotic- and high-light stresses on PSII efficiency of attached and detached leaves of three tree species adapted to different water regimes[J]. Photosynthetica, 49(4): 555-563.
WEI RP, HU DH, CHEN JH, et al., 2018. Response of roots morphological characteristics and nutrient utilization to low phosphorus stress among five clones of *Cunninghamia lanceolate* (Lamb.) Hook.[J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed), 42(2): 1-8.[韦如萍，胡德活，陈金慧，等，2018. 低磷胁迫下杉木无性系根系形态及养分利用响应研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，42(2)：1-8.]
XIE YR, ZHOU ZC, JIN GQ, et al., 2003. Kinetics of phosphorus uptake by different provenances of masson pine under low phosphorus stress[J]. For Res, 15(5): 548-553.[谢钰容，周志春，金国庆，等，2003. 马尾松不同种源 P 素吸收动力学特征[J]. 林业科学研究，15(5)：548-553.]
XING YY, ZHANG FC, ZHANG Y, et al., 2014. Irrigation and fertlization coupling of drip irigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 30(21): 70-80.[邢英英，张富仓，张燕，等，2014. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报，30(21)：70-80.]
YIN YG, YUAN JW, LIU CJ, et al., 2020. Effects of NaCl stress on leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Vitis* sp. rootstocks[J]. J Agric Sci Technol, 22(8): 49-55.[尹勇刚，袁军伟，刘长江，等，2020. NaCl 胁迫对葡萄砧木光合特性与叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农业科技导报，22(8)：49-55.]
YUAN F, LUO Q, XIA XH, et al., 2022. Effects of salt and phosphorus stress on seed germinationand seedling growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa*[J/OL]. Guihaia, 1-11.http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20211231.1642.016.html.[袁锋，罗倩，夏心慧，等，2022. 盐磷胁迫对木麻黄和台湾相思种子萌发及幼苗生长的影响[J/OL]. 广西植物，1-11.http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20211231.1642.016.html.]
YUAN F, WANG YY, LI MJ, et al., 2020. Dynamic characteristics of metal element content and return of *Casuarina equisetifolia* itter at different distances to the coastline [J]. Chin J Plant Ecol, 44(8):819-827.[袁锋，王艳艳，李茂瑾，等，2020. 不同海岸距离上木麻黄凋落叶金属元素含量及归还量动态特征[J]. 植物生态学报，44(8)：819-827.]
ZHANG HX, SONG D, LIU ZX, 2008. Study on physiological characteristics and salt tolerance for seedlings of 11 tree species[J]. For Res, 21(2): 168-175.[张华新，宋丹，刘正祥，2008. 盐胁迫下 11 个树种生理特性及其耐盐性研究[J]. 林业科学研究，21(2)：168-175.]
ZHANG JF, ZHANG XD, ZHOU JX, et al., 2005. Effects of salinity stress on poplars seedling growth and soil enzyme activity[J]. J Appl Ecol, 16(3):426-430.[张建锋，张旭东，周金星，等，2005. 盐分胁迫对杨树苗期生长和土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报，16(3)：426-430.]
ZHANG QL, CHEN WH, ZHANG YH, et al., 2012. Investigation of chlorophyll content in *Acacia confusa* leaves using a hyperspectral remote sensing estimation model[J]. J

Fujian Norm Univ(Nat Sci Ed), 28(2): 32-40.[张清林，陈文惠，张永贺，等，2012. 台湾相思树叶片叶绿素含量的高光谱参量模型研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版)，28(2)：32-40.]

ZHANG R, XU JX, XUE L, et al., 2014. Effects of low temperature stress and release by chilling on physiological characteristics of four broadleaf seedling types[J]. Ecol Sci, 33(3): 419-425.[张柔，许建新，薛立，等，2014. 低温胁迫和解除对 4 种阔叶幼苗生理特征的影响[J]. 生态科学，33(3)：419-425.]

ZHANG YB, CAO QJ, ZHANG M, et al., 2009. Effects of phosphorus application on chlorophyll fluorescence characteristic and quality of spring maize[J]. J Maize Sci, 17(4): 79-81.[张玉斌，曹庆军，张铭，等，2009. 施磷水平对春玉米叶绿素荧光特性及品质的影响[J]. 玉米科学，17(4)：79-81.]

ZHANG YY, LI SY, 2013. Relationship between soil phosphorus and plant[J]. World For Res, 26(5):19-24.[张雨瑶，李世友，2013. 土壤磷与植物关系研究进展[J]. 世界林业研究，26(5)：19-24.]